

高温ガス炉水素製造システムの高温熱交換器設計について

清水 明*・藤川 卓爾**・森 英夫***

Design of High Temperature Heat Exchangers for “High Temperature Gas-cooled Reactor Hydrogen Production System”

SHIMIZU Akira, FUJIKAWA Takuji, MORI Hideo

As the high temperature gas-cooled reactor can supply high temperature gas to application systems, it is expected to be applied for generating hydrogen, which will play a central role as a secondary energy source in the 21st century along with electricity.

As the design temperature of heat exchangers is high, the allowable stress in component parts becomes small. Various design considerations, such as structural design, material development, stress reduction and cooling methods etc. are necessary.

This paper describes the role of heat exchangers used for the “high temperature gas-cooled reactor hydrogen production system” and the design philosophy related to the equipment handling the high temperature fluids, and introduces the outline and performance test results of the intermediate heat exchanger and steam reformer as examples.

1. 緒 言

高温の熱エネルギーが取り出せるという特徴があるため、高温ガス炉 (HTGR: High Temperature Gas-cooled Reactor) は、電気とともに21世紀の二次エネルギー源として中心的な役割を担うであろう水素の製造に適用されることが期待されている。一方、高温ガス炉用の熱交換器の機器設計に関しては、高温になるに従い構成部品の許容応力が小さくなるため、構造設計、材料の開発、発生応力の低減、冷却方法の工夫等の設計対応が必要とな

る。本稿ではこの高温ガス炉システムに使用される熱交換器類の役割を説明し、高温の流体を取り扱う機器の設計思想について述べる。また、高温熱交換器の例として、中間熱交換器 (IH: Intermediate Heat Exchanger) と水蒸気改質器を取り上げ、その設計の概要と性能試験結果を紹介する。

2. 高温ガス炉熱利用系の系統設計

2.1 水素製造方法の選択

高温ガス炉開発のための試験・研究用原子炉で

* 大学院工学研究科社会人博士課程

** 工学部機械工学科教授

*** 九州大学大学院工学研究院教授

2007年9月28日受付

ある高温工学試験研究炉(HTTR: High Temperature Engineering Test Reactor)熱利用系は、原子力の利用分野を電力以外の分野に拡大して熱効率の向上をはかる核熱利用の多様化の有効性を実証することを目的としているが、その中でも特に水素製造が重要視されている。

現在、商業化されている水素製造技術には、メタンと水を原料にして化石燃料をエネルギー源とする水蒸気改質法や水の電気分解法等があるが、アンモニア、メタノールなどの化学製品の原料用水素の約9割が水蒸気改質法で製造されている。水蒸気メタン改質(SMR: Steam Methane Reforming)とも呼ばれる天然ガス(メタンが主成分)の水蒸気改質は、現状では商用向けに大量の水素を製造する主要でまた最も安価な方法である。高温(700~1100℃)においてニッケル等の金属触媒が存在すると、水蒸気はメタンと反応して一酸化炭素と水素が得られる。現在の水蒸気改質法においては、化石燃料は、水素の原料になるだけでなく、燃焼させることにより熱源としても利用される。原料となるメタンの量は全体の70%で、熱源として燃焼に使うメタンの量は全体の30%程度に及ぶ。もし、この熱源を原子炉から供給すると、この30%程度に及ぶ燃焼分のメタンを節減することが可能になる。

水蒸気改質反応(吸熱反応)の反応平衡からみると、生成する水素ガスの割合を高くするには、高温であればあるほど有利になり、最低でも約700℃以上の温度を必要とするので、通常の軽水炉ではなく、高温ガス炉と組み合わせる方法が有望視されている¹⁾。

改質反応: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2 - 206\text{kJ/mol}$

シフト反応: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2 + 41\text{kJ/mol}$

合計 $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + 4\text{H}_2 - 165\text{kJ/mol}$

ただし、この反応は可逆反応であり、正反応と逆反応の速度が等しくなったところで、化学平衡が成り立ち、最終的に生成したガスは水素、二酸化炭素、一酸化炭素、過剰に加えた水蒸気等を含む気体の混合物となっている。

日本原子力研究開発機構では、主に以下に示す

理由から天然ガスの水蒸気改質システムを、HTTRと接続する水素製造システムの第1候補として選定し、研究を続けて来た。

- (1) 一般産業界での十分な使用実績があり、高温ガス炉の核熱利用の早期実証と核熱利用技術の早期蓄積が可能である。
- (2) 本システムで開発された運転・制御技術および安全技術が他の水素製造システムにも応用可能である。

2.2 現状のHTTRの冷却系統

わが国初の高温ガス炉として日本原子力研究開発機構の大洗研究所内に建設された高温工学試験研究炉HTTRは、現在、原子炉と主冷却系統と中間熱交換器IHX等の上流側の試験を実施中である。その原子炉冷却系統は、図1に示すように、通常運転時の熱を除去するIHX、1次加圧水冷却器(PPWC: Primary Pressurized Water Cooler)、2次加圧水冷却器(SPWC: Secondary Pressurized Water Cooler)および空気冷却器(ACL: Air Cooler)設備からなる主冷却設備(Main cooling system)、原子炉スクラム時に作動する補助冷却設備(Auxiliary cooling system)等からなる²⁾。

将来の水素製造試験等のHTTRを用いた熱利用試験の際は、IHXの2次側から原子炉格納容器外に原子炉の熱エネルギーを取り出す予定である。

2.3 水蒸気改質法による水素製造システムを接続した場合の系統設計

熱利用試験の一例として、図2に水蒸気改質法によるHTTR水素製造システム(以下「水素製造システム」と呼ぶ)の全体系統図を示す³⁾。

水素製造量は4200Nm³/h(375kg/h)である。HTTRの原子炉で加熱された1次ヘリウムガスは原子炉格納容器にあるIHXで2次ヘリウムガスを加熱する。905℃の高温になった2次ヘリウムガスは、原子炉格納容器を出て、高温隔離弁を通り、原子炉建屋と水素製造施設を結ぶトレンチ内の高温二重配管の内管を通り、放熱により温度が

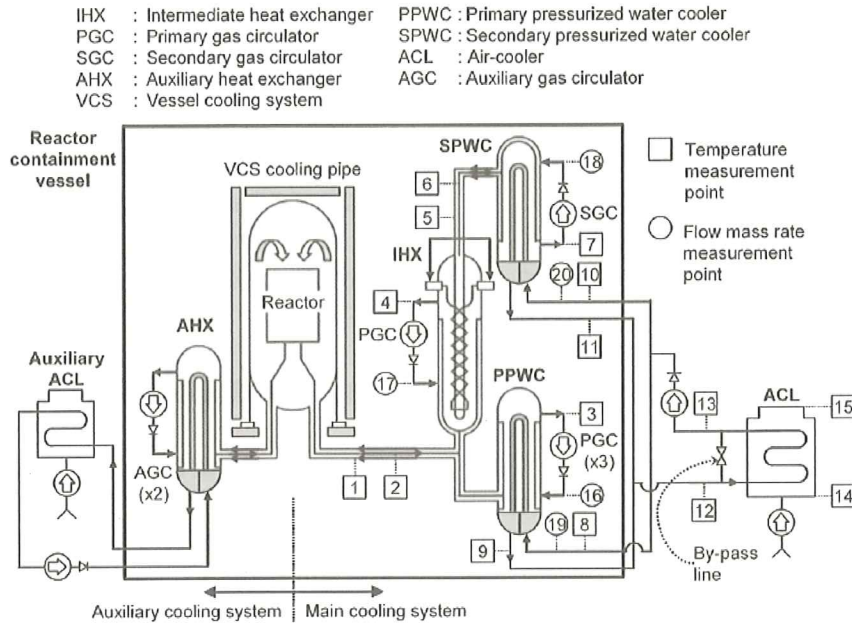


図1 HTTR 冷却系統

[出典] 栃尾大輔他「高温ガス炉 HTTR の高温試験運転における主冷却系熱交換器の性能評価」, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.4, No.2, (2005)

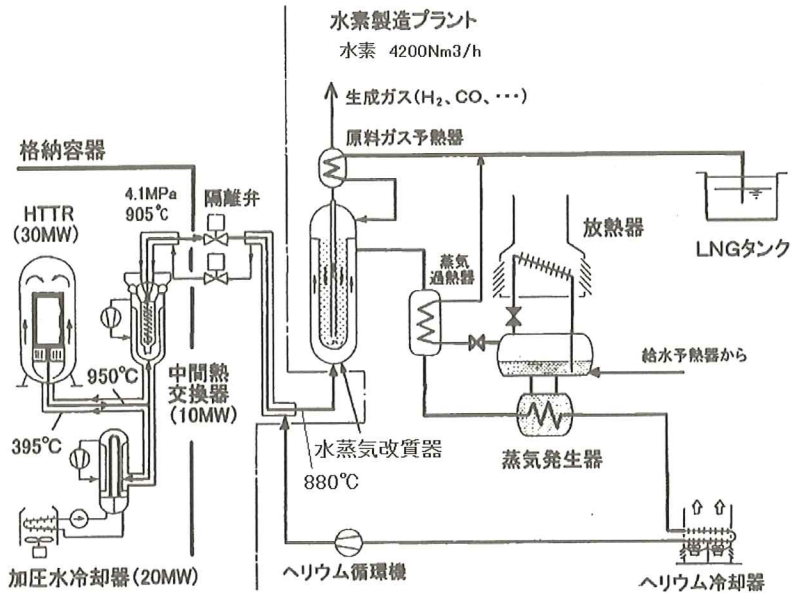


図2 HTTR 水素製造システム

[出典] 西原哲夫, 清水 明他「HTTR に接続する水素製造システムの系統及び機器設計(受託研究)」, JAERI-Tech2002-101, (2003-1)

少し下がり、水素製造施設の水蒸気改質器に880℃で供給される。2次ヘリウムガスは水蒸気改質器ではメタンガスと水蒸気から水素を製造するための加熱源として使用され、さらに蒸気過熱器では飽和蒸気を過熱蒸気に加熱するのに使用される。蒸気過熱器から流出した2次ヘリウムガスは、蒸気発生器に入り給水を加熱して飽和蒸気とする。蒸気発生器を出た2次ヘリウムガスはヘリウム冷却器で出口温度を一定にするように制御されたのち、ヘリウムガス循環機に入り、ここで系統の圧力損失に見合う昇圧を行ない、系統に送り出される。系統に送り出された2次ヘリウムガスは、二重配管の外管を通り、低温隔離弁を経由してIHXに150℃で供給され、再び1次ヘリウムガスの熱で加熱される。

系統の詳細とヒートマスバランスを図3に示す⁴⁾。原料ガス系(Natural Gas Feed Line)には、LNGタンク(LNG tank)内の液化天然ガス(大部分がメタンガス)をLNG蒸発器(LNG evaporator)で気化した後、一時貯蔵して圧力変動を吸収するための原料ガスサージタンク(図3では省略)、活性炭脱硫器(Desulfurizer)、流量調整弁(図3では省略)、

水蒸気と混合後のメタンガスを加熱し、水蒸気改質器(Steam reformer)入口温度を所定の温度とする原料ガス予熱器(Feed gas preheater)が設置されている。

水蒸気改質器がトリップした際などに、蒸気発生器(Steam generator)で大量に発生した蒸気を冷やして、凝縮するための放熱器(Radiator)が、蒸気発生器-放熱器循環ループ(図3では省略)に設置される。

3. 高温機器設計手法の違い

IHXや水蒸気改質器は従来の高温機器に比較して、部品要素の温度が高くなることが特徴である。これら高温ガス炉熱利用系に使用する高温熱交換器の強度設計の考え方について、既存の火力発電プラントの高温機器と比較した。結果を表1に示す。

3.1 ボイラの強度設計法

ボイラの場合は石炭、石油等の燃料の燃焼によって発生した熱エネルギーを、また原子炉の場

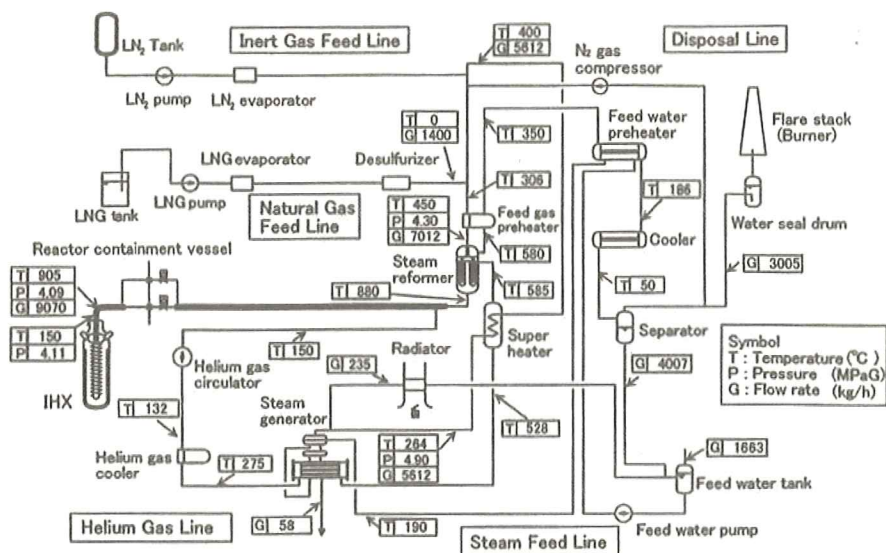


図3 HTTR 水素製造システムヒートマスバランス

[出典] 西原哲夫, 清水 明他「HTTR 水素製造システムの系統構成および制御性」
日本原子力学会和文論文誌, Vol. 2, No. 4, (2003)

表1 各種高温機器の強度設計比較

分類	種類	機器	加熱源		断熱材	伝熱管, 翼		被加熱流体	
			種類	温度 ℃		材質	許容 温度 ℃	種類	温度 ℃
熱源	火力	ボイラ	燃焼ガス	1400	—	SUS 鋼	<660	蒸気	~600
	原子力	軽水炉	酸化ウラン	1870	—	ジルコニウム合金	<700	加圧水蒸気	~282
		高温ガス炉	黒煙被覆ウラン	1320	—	黒鉛	<1500	1次Heガス	~950
熱交換器	原子力	中間熱交換器	1次Heガス	950	—	ハステロイ XR	<1000	2次Heガス	905
		蒸気発生器	2次Heガス	880	—	低合金鋼	<550	水蒸気	259
		水蒸気改質器	2次Heガス	880	—	ハステロイ XR	<1000	原料ガス	~780
タービン	火力	蒸気タービン	蒸気	600	—	リフラクトアロイ	<650	—	—
		ガスタービン	燃焼ガス	1400	セラミックス	Ni基超耐熱合金	<900	冷却空気	200

合には、核分裂反応で発生した熱エネルギーを水に伝えて、蒸気を発生させる。火力プラントの場合は、ボイラの火炉で飽和蒸気を発生させた後、さらにその蒸気を過熱器に通し、過熱蒸気としてサイクルの熱効率を上げる工夫がなされている。また、高圧タービンの排気を再熱器で再度加熱する再熱サイクルおよび抽気で給水加熱をする再生

サイクルを採用して、熱効率を上げている。

ボイラの伝熱管の外側と内側の流体温度を図4に示す⁵⁾。伝熱管の温度は、必ず管の内外の流体温度の中間に位置している。かつ、ボイラの場合は管内の水・蒸気側は、蒸発域では沸騰熱伝達、過熱域では蒸気流速を大きく設定することにより、管外の燃焼ガス側に比べて熱伝達率が桁違いに大きく(約75倍)なり、伝熱管の最高温度は管内の低温側に近くなる(内部流体温度支配と表現する)。図4の例では、内外の流体温度差が最大で1200℃(外側1400℃-内側200℃)あるが、伝熱管の内面温度は内部流体温度より約20℃程度高くなる(内外面の熱伝達率が約75倍違うと、内側の流体と伝熱管との温度差は全体温度差の約1/75となる)が、過熱器伝熱管の外面温度は600℃から650℃程度で設計可能である。

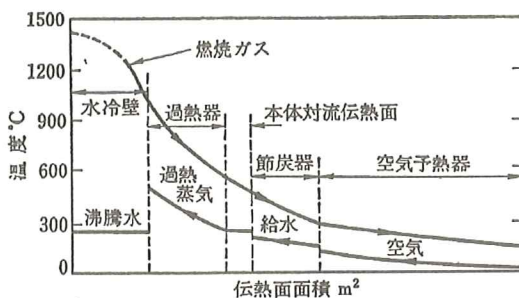


図4 ボイラ伝熱面の流体温度

[出典] 阿部 豊「対流伝熱と各種伝熱面」,
筑波大学大学院構造エネルギー工学講義資料

3.2 タービン翼の強度設計法

高温高圧の流体を利用して熱エネルギーを動力

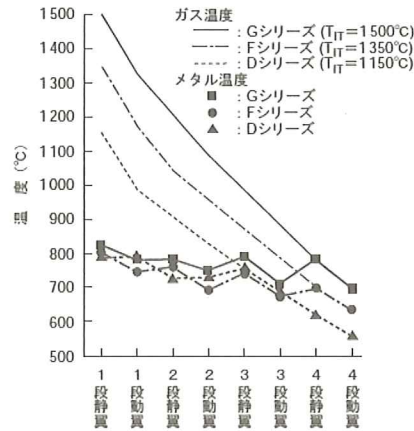


図5 ガスタービンメタル温度

[出典] 福泉靖史他「大容量ガスタービンの最新技術動向」
三菱重工技報, Vol.40, No. 4, (2003-7)

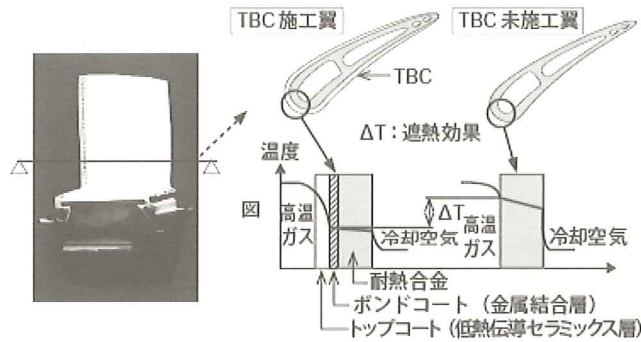


図6 遮熱コーティング(TBC: Thermal Barrier Coating)の遮熱効果

[出典] 塚越敬三他「大型発電用ガスタービンの最新技術動向」
三菱重工技報, Vol. 42, No. 3, (2005-10)

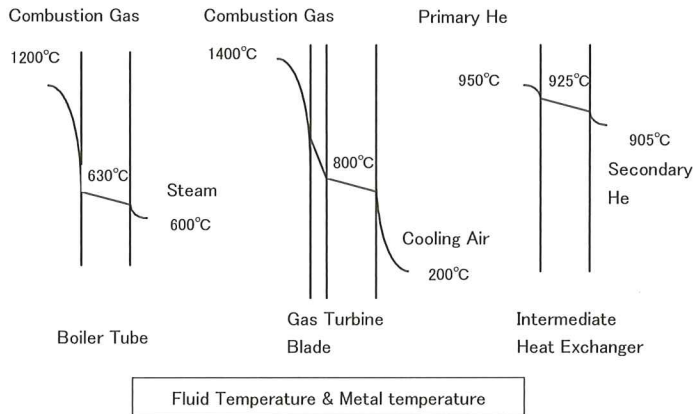


図7 流体温度とメタル温度の関係

に変換するエンジンの分野でも高温設計が進んでいる。自動車用ガソリンエンジンや、船用ディーゼルエンジンなどのレシプロ式エンジンでは、爆発した燃焼ガスは高温を維持する時間が短く、すぐに排気されるため、シリンダーや排気弁は無冷却あるいは潤滑油、冷却水による冷却で充分健全性を保つことができる。これに対して、タービンの動静翼は、常時高温の流体中に曝されて高温となるので耐熱鋼の採用や冷却方法等の工夫が必要となる。以下に蒸気タービン翼とガスタービン翼の強度設計法を概説する。

3.2.1 蒸気タービン翼の設計法

火力プラントの蒸気条件の改善により、最近ではタービン入口蒸気温度は最高で620℃になっている。タービン翼の温度は蒸気温度より高くなることはないので、翼の材料選定という面ではボイラより余裕がある。しかし、動翼は高速で回転するので、発生する遠心応力はボイラの伝熱管に比べて大きくなり、それに応じた設計が要求される。動翼材料として、600℃、600℃超級ではオーステナイト系のレフラクトアロイ等が使用される。

3.2.2 ガスタービン翼の設計法

ガスタービンの入口温度(TIT)の高温化は熱効率向上、出力増大をもたらす。これを実現するためのタービン翼等高温部材の冷却技術は材料、加工技術とともに、ガスタービンの発達にとってキーテクノロジーである。実用機の入口温度レベルは1500℃に達している。空気冷却技術、蒸気冷却技術の高度化、優れた耐熱材料の適用、セラミックス遮熱コーティング(TBC: Thermal Barrier Coating)の適用などにより、TITはさらに高温化されると思われる。

TITの上昇に伴い、空気による冷却技術も進歩してきた。図5に三菱重工業のガスタービンの第1段～第4段動静翼の例を示すが、フィルム冷却による全面膜冷却、TBC等を採用し、従来機並みの約800℃台のメタル温度を維持している⁶⁾。

図6にTBCの遮熱効果を模式的に示す⁷⁾。熱伝導率が小さいセラミックスを翼外面にコーティングすることにより、翼本体の金属部分の温度を低

く保つことができる。

熱交換器伝熱管の場合は、高温流体の持つ熱エネルギーをできるだけ高い温度で被加熱流体に伝えることが目的であるが、ガスタービン翼の場合は、伝熱が目的ではないので冷却によって翼のメタル温度を十分に低くする手法がとれる。

3.3 熱交換器伝熱管の強度設計法

高温ガス炉用の熱交換器、特に、IHXの伝熱管の温度は、火力プラントのボイラの伝熱管やガスタービン翼と比較して、より高温になる。

前述の表1に高温ガス炉に採用される3種類の熱交換器と現在産業界で使用されている各種高温機器に対して、流体の温度と伝熱管の許容温度を比較して示す。

高温側の流体温度を比べると、火力発電用ボイラ、ガスタービン等は、燃焼ガスを使うため約1400℃(前述のように最新鋭のガスタービンではTITは1500℃であるが、ここでは一般に多用されている1400℃とした)の高温となる。それに対し、IHXは水素製造システムと接続して使用される場合は、原子炉からの1次ヘリウムガスが約950℃で流入するので、高温側流体の温度だけで比較すると設計は一見容易と見える。しかし、低温側流体の温度を比較すると、ボイラの場合は現在の主力となる蒸気条件で、約600℃、ガスタービンの場合は被加熱流体ではなく冷却用空気の温度が約200℃であるのに対し、IHXの場合は2次ヘリウムガス温度が、出口付近で905℃と一番高くなる。

図7に内外の流体の温度とそれを隔てる金属壁のメタル温度の関係を示す。メタル温度は、高温側流体と低温側流体の温度の算術平均温度ではなく、高温側外面と低温側内面の熱伝達率に密接な関係がある。熱伝達率が高い面では、流体と壁面との温度差が小さくなる。流体が高速で流れる、あるいは沸騰している面では熱伝達率が高く流体温度と壁面温度の差が小さくなる。

ボイラについては、蒸気温度が約600℃と低く、かつ伝熱管内面の熱伝達率が外面の約75倍と非常に大きくなるので、伝熱管の温度は低温側の流体

に引かれて低くなり約630℃以下になる。管材質はSUS材などを使えば問題なく設計できる。

一方ガスタービン翼の設計で有利となるのは、伝熱管でないため、冷却、断熱といった手段がとれるところである。ガスタービン翼については1400℃の燃焼ガス中に曝されるが、翼内部に冷却空気を流し、翼表面からフィルム状に吹出させることにより翼のメタル温度を下げる手段がとられる。また、熱伝導率の小さなセラミックスを翼外面にコーティングすることにより、翼本体の金属部分の温度を低く保つことができる。これにより、高温側流体と低温側流体の平均温度である約800℃付近までメタル温度を下げる事が可能となった。タービン動翼の場合は大きな遠心力がかかるので、この800℃台の温度が限界となる。

これに対して、IHXを例としてあげると、高温ガス炉用の熱交換器伝熱管の温度はボイラ伝熱管、タービン翼に比べて非常に高くなる。上述のように、IHXが水素製造システムと接続して使用される場合は、高温側流体の1次ヘリウムガスの入口温度が950℃に対し、低温側流体である2次ヘリウムの出口温度が905℃となり、熱エネルギーは伝熱管を通じて授受されるので、伝熱管のメタル温度は、外側と内側の流体温度の中間で約925℃となる。伝熱管に発生する応力は、自重、内外の圧力差と熱応力であり、タービン動翼に比べると小さいが、メタル温度が900℃以上になると許容応力も小さくなるので、高温強度に優れたハステロイXRを開発の上使用している。伝熱管以外、例えば内筒、外胴のような部分は、低温のヘリウムガスによって冷却したり、高温流体に接する部分に断熱材を取り付けることによってメタル温度を低くしている。

4. IHXの研究開発

4.1 材料の開発

HTTRでは原子炉内部構造物、中間熱交換器の内部で、900℃前後の高温に曝される部分につい

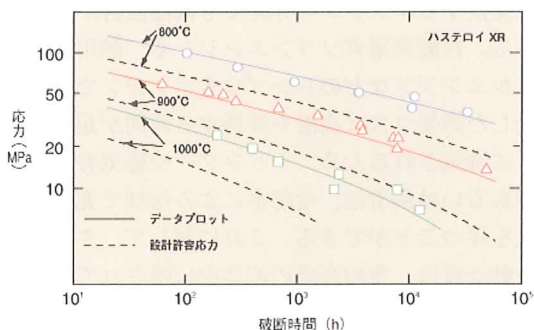


図8 ハステロイXRの許容応力曲線

[出典] 日本原子力研究所「たゆまざる探求の軌跡—1996」

ては、高温でもクリープ破断を起こしにくい高強度を有すること、かつヘリウムガス中に含まれる微量の不純物による材料の腐食、クラックなどが発生しないことを確認しておく必要がある。

HTTRの高温構造設計において、重要な材料試験データの一つは10万時間のヘリウムガス中クリープ破断強さであるが、10万時間のヘリウムガス中クリープ試験を実施するには12年以上の年月が必要となる。そこで約3万時間までの試験を行い、そのデータを基礎にLarson-Miller法を使って10万時間のクリープ破断強さを推定するのが現実的な対応策である。日本原子力研究所(日本原子力研究開発機構の前身)ではハステロイXRについて、一連のクリープ試験を行い、図8に示すように設計許容応力曲線を十分に上回ることを確認した。

ヘリウムは不活性ガスであるにもかかわらず、クリープ試験中に材料が劣化する要因は、ヘリウムガス中に含まれる微量の不純物(メタン(CH_4)、一酸化炭素(CO)、二酸化炭素(CO_2)、水素(H_2)、水蒸気(H_2O))と考えられ、これが材料を腐食して表面クラックを進展させる。ハステロイXRはハステロイXをベースとして、腐食に対する耐性を改良した材料である。日本原子力研究開発機構では、ハステロイXRがヘリウムガス中で長期間にわたり応力を付加されても健全であることを確認する実験データを取得している⁸⁾。

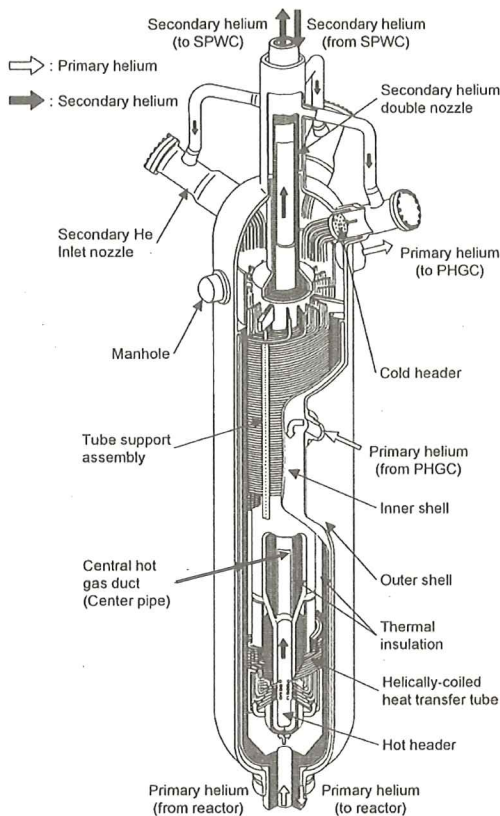


図9 HTTRのIHX構造図

[出典] 栃尾大輔, 中川繁昭「HTTRの中間熱交換器の伝熱性能に関する評価」JAERI-Tech 2005-040, (2005-7)

4.2 構造の概要

IHXの構造図を図9に示す。IHXの基本構造は以下のとおりである^{9), 10)}。

- ①IHXの熱交換方式は1次冷却材が胴側を、2次冷却材が管側を流れる交流方式の堅置シェルアンドチューブ型である。
- ②IHXの伝熱管は、ヘリカルコイル型平滑管を用いる。
- ③IHXの外胴(Outer shell)の安全性向上のために、外胴内側に沿って熱交換を終えた低温の1次ヘリウムガスを流す外胴強制冷却式構造とする。低温側1次ヘリウムガスの圧力はIHXの1次ヘリウムガス循環機(PHGC: Primary Helium Gas Circulator)で昇圧した後に高温側1次ヘリウム

ガス圧力より高くして外胴冷却を行う。

- ④IHXの伝熱管自重は内筒(Central hot gas duct)上部に設置する支持梁(Support beam)から吊り下げた伝熱管支持板(Tube support assembly)で支持する。

- ⑤IHXの高温管束集合部(Hot header)は、発生する応力を小さくできるように、平板ではなく円筒形をしたマニホールド形式とする。

これらの、構造を採用する理由は以下に述べるとおりである。

4.3 構造の開発

4.3.1 伝熱性能の向上

IHXは1次ヘリウムガスの熱エネルギーを2次ヘリウムガスに伝え、かつ、1次系と2次系を分離して万一熱利用系で配管破断等があっても、原子炉への影響を少なくし、原子炉をゆっくり安全に止める役割を担っている。伝熱量は原子炉の出力をループ数(2~4)で割った値であるので大きな値である。一方、熱利用系で利用できる温度をできるだけ高くする必要がある。水素製造システムの場合は、交換熱量は10MWと計画しており、水素製造システムの定格条件ではIHX入口1次ヘリウムガス温度を950℃、出口2次ヘリウムガス温度を905℃としている。このように交換熱量が大きくまた管外と管内の温度差が小さくなると伝熱面積が大きくなる傾向があることから、それを抑えるために伝熱性能をできるだけ良くする必要がある。そのためには、管内および管外の流速を速くすることが有効であるが、流速を速くしすぎると圧力損失が大きくなり、ヘリウムガス循環器の動力が大きくなるので、自ら限界がある。管内の流速を上げるために伝熱管の本数を少なくしているが、それによって伝熱管が長くなるため、直管ではなくヘリカルコイル型に加工して熱交換器の容器のコンパクト化を図っている。

4.3.2 温度の低減

4.2の③のように、IHXの胴を二重構造として外胴を強制冷却する理由は高温配管で二重管を採用するのと同じである。

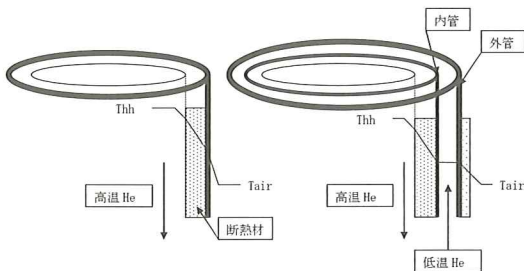


図10 単管と二重管の温度分布の比較
(容器の単胴と二重胴も同様)

図10に内部に高温ヘリウムガスを流す構造として単管と二重管を比較して示す。2次ヘリウムガス高温二重配管では、耐圧部は外管である。内管と外管の間の環状部に低温(300℃)の2次ヘリウムガスを流すことにより外管の温度を低減して許容応力を大きくとれるので、約4 MPaの内圧がかかっても板厚を小さくできる。内外の2次ヘリウムガスの中間温度になる内管については、高温ガスの流れる内側に断熱材を貼り、メタル温度を極力低温側流体に近づける。また内管には、内外差圧としてヘリウムガス循環機の昇圧分の約0.2 MPaの外圧がかかっているが、差圧が小さいため発生応力が小さく健全性が確保できる。図10に高温ヘリウムガスから外部の空気に到る温度分布を模式的に示す。外管の計算上の温度は、両者で大差ない。単管の場合は断熱材の施工不良で、内部にヘリウムガスのバイパスする流路等が発生した場合は、耐圧管が局所的に温度上昇してその部分の許容応力が小さくなることが考えられるが、二重管の場合は外管の内部には必ず低温のヘリウムガスが流れており、耐圧管である外管を低温に保つ担保が得られている。

容器についても、同じ理由から二重構造が採用されるが、IHXについてもこの外胴強制冷却式構造を採用している。

断熱材の施工の目的の第一は高温流体の熱エネルギーが、壁を通して低温流体に伝わることにより、熱効率の低下を招くことを防止するためであるが、高温流体側に断熱材を貼ることにより、メタル温度をできるだけ低温流体に近づけて許容応

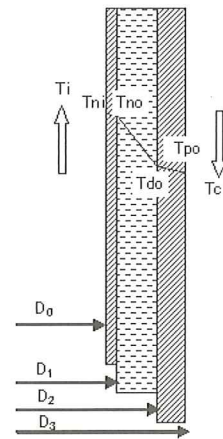


図11 IHX 内胴温度分布模式図

表2 IHX 内胴温度試算例

項 目			記号	単位	数値
寸 法	断 熱 材 押 え 金 物	内 径	D ₀	mm	1,370
		外 径	D ₁	mm	1,380
		板 厚	t ₁	mm	5
	内 胴	内 径	D ₂	mm	1,700
		外 径	D ₃	mm	1,740
		板 厚	t ₃	mm	20
	断 熱 材	厚 さ	t ₂	mm	160
各点温度 計算結果	内側ヘリウムガス温度		T _i	℃	850
	押 え 板 内 側		T _{ni}	℃	837.2
	押 え 板 外 側		T _{no}	℃	836.9
	断 熱 材 外 側		T _{do}	℃	399.9
	内 胴 外 側		T _{po}	℃	398.1
	外側ヘリウムガス温度		T _c	℃	395.0
最高使用温度(内胴)			T _{max}	℃	430

力を大きくとり、板厚を薄くする効果もある。高温内部断熱一重配管や、IHXの内胴等は、その目的で内側の高温流体側に断熱材を貼る。

図11にIHX内胴の温度分布模式図を示し、表2にその温度を試算した例を示す。また図12に温度分布を計算する場合の簡単なモデルを示す。高温側の流体温度から、高温側の熱伝達、ライナメタル内部の熱伝導、断熱材内部の熱伝導、内胴メタル内部の熱伝導、低温側壁面での熱伝達を経て、低温の流体温度になるが、それらの異種の熱伝達、

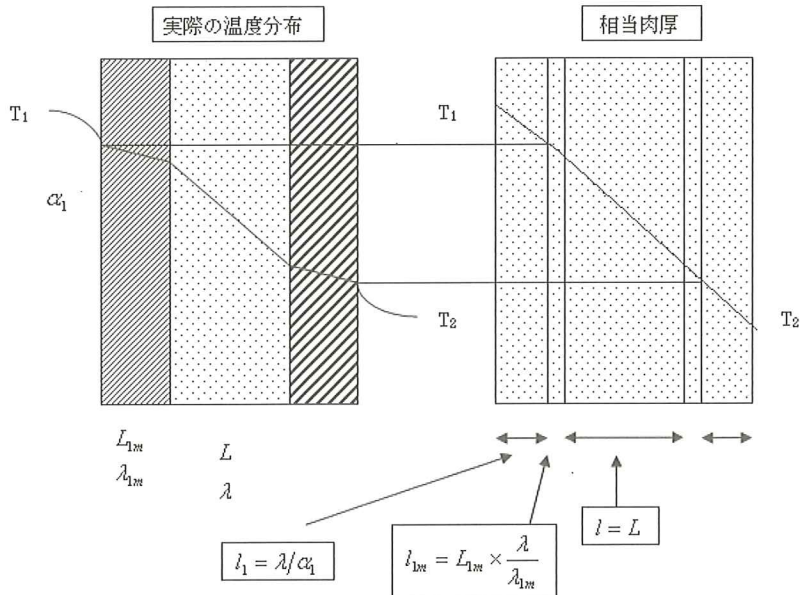


図12 高温流体から低温流体への熱移動の相当肉厚表示

熱伝導を，熱伝達率，熱伝導率を考慮して換算した同一材料の相当肉厚で表わす。例えば，メタル部分は熱伝導率が高いので相当肉厚が小さく，断熱材は熱伝導率が低いので相当肉厚が大きくなる。また，表面の熱伝達率が α の場合は，表面に相当肉厚 $=\lambda/\alpha$ (λ は基準とする材料の熱伝導率)の部材が加わったと仮定して，加わった部材の表面温度を流体温度とする。このようにすると内面流体から外面流体までの温度分布が単一材質の物体内の熱伝導と同様に表せる。熱伝達の良い壁面では相当肉厚が小さくなり，壁面と流体の温度差が小さくなることが視覚的に理解できる。

ヘッダーについても，500℃以下であれば，許容応力が大きく，断熱材なしでも問題はないが，900℃近いIHXの高温ヘッダーでは，平板状の管板ではなく円筒状のマニホールド型ヘッダーを採用し，マニホールド外側の1次ヘリウムガスに接する部分に断熱材を施工することにより，マニホールドのメタル温度を高温の1次ヘリウムガス入口温度(950℃)ではなく，2次ヘリウムガス出口温度(水素製造システムの定格条件では905℃，HTTR 高温試験モード時は860℃)に近づける考慮

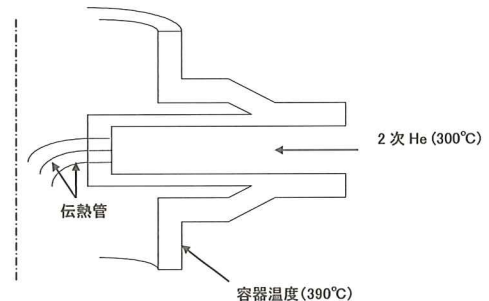


図13 サーマルスリーブ概念図

がなされている。また，断熱材を貼ることにより板厚方向の温度差を小さくして，発生する熱応力を低減している。

4.3.3 温度差，温度勾配の低減

2次ヘリウムガス入口ノズルはサーマルスリーブ状としている。サーマルスリーブとは袖状の円筒で，容器と流入する流体の温度差によって，入口配管付根部に生じる温度勾配を緩和する目的を持っている。すなわち同じ温度差でも軸方向に長くすることで，温度勾配が小さくなり，発生する熱応力を小さくできる。図13にサーマルスリーブの概念図を示す。入口配管の温度は，流体の温度

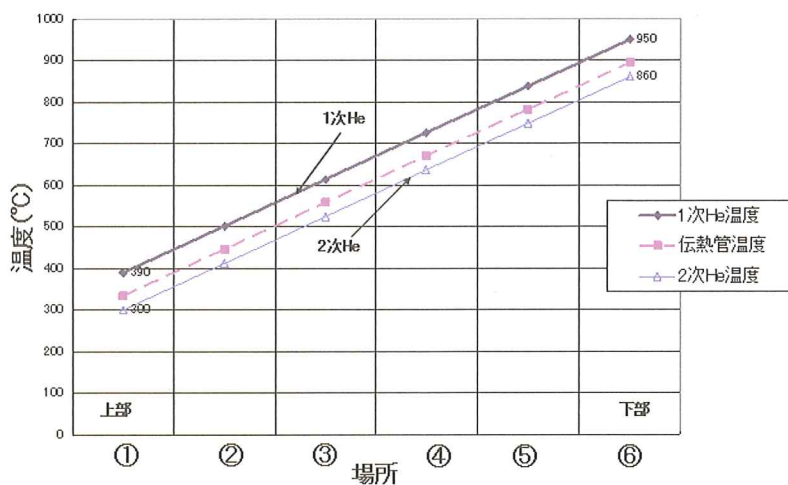


図14 IHX内の1次ヘリウム，2次ヘリウム，伝熱管の温度分布

表3 IHXの伝熱管支持金物の支持方式比較

項 目	①	②	③
支持方式概念図			
支持方式説明	伝熱管支持板を内筒に固定	伝熱管支持板は内筒と分離してタイロッドで吊下げ	層毎に分割した伝熱管支持金物をタイロッドで吊下げ
熱 応 力	×	△	○
	支持板の温度はほぼ1次Heの温度，伝熱管の温度は1次Heと2次Heの中間の温度		
組 立 方 法	×	×	○
	①，②は組み上がった伝熱管支持板にコイルを回転させながら挿入 ③はコイルを二つ割りにした伝熱管支持金物で外側と内側から挟み込んで組立		

とほぼ等しくなるが，流体の温度と容器の温度との温度差がある場合はスリーブ部分を長くとり温度勾配を緩やかにする。また，この方法は機器の起動停止の際に温度追従性の良い配管部分と温度追従性の悪い容器部分の熱過渡の追従性の違いに

より生じる熱応力を緩和する設計としても有用である。

次に，IHXの伝熱管と管束支持板の温度差による熱応力の低減について，1次ヘリウムガスと2次ヘリウムガスの温度差が大きくなって熱応力

が大きくなる HTTR 高温試験モード時について述べる。図14に IHX 中の 1 次ヘリウムガス、2 次ヘリウムガス、伝熱管の HTTR 高温試験モード時の温度分布を示す。場所①は 2 次ヘリウムガスが伝熱管に流入する容器の上部を示し、場所⑥は 1 次ヘリウムガスが流入する容器の下部(高温部)を示す。950℃で流入した 1 次ヘリウムガスは、上昇する間に、ヘリカルコイル伝熱管内を下降する 2 次ヘリウムガスを最高温度860℃まで加熱する。伝熱管の温度は、1 次ヘリウムガス温度と 2 次ヘリウムガス温度の間になるが、管内の熱伝達率の方が、管外の熱伝達率より高いので、2 次ヘリウムガスの温度に近くなる。1 次ヘリウムガス温度と伝熱管の温度差は約55℃で、伝熱管と 2 次ヘリウムガス温度の温度差の約35℃より大きく

なる。伝熱管の支持方式の比較を表 3 に示す。①の方式では、伝熱管支持板の温度は 1 次ヘリウムガスとほぼ同じ温度で半径方向に大きく熱伸びするのに対して、上方から見て円形状に見える伝熱管は温度が低いため、半径方向の熱伸び量が伝熱管支持板より小さくなるので、両者を完全固定すると大きな熱応力が生じることになる。②の方式では、伝熱管支持板を内筒と切り離して吊り下げることにより平均半径位置での熱応力が 0 になり、①の方式に比べて大幅に熱応力が軽減される。しかし、支持板が半径方向に一体であるので平均半径位置の内側と外側では逆向きの熱応力が発生する。③の方式では、伝熱管支持金物を各層毎に独立させることにより、熱応力を大幅に軽減できる。熱応力の大きさと、組立方法の容易さから、IHX

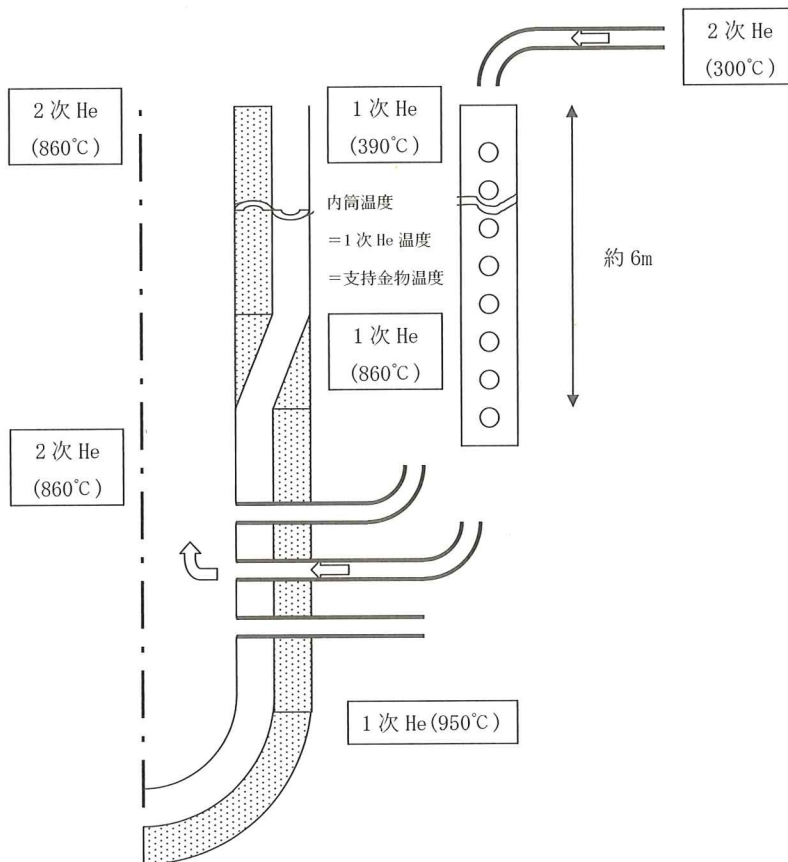


図15 IHX の熱応力軽減のための構造

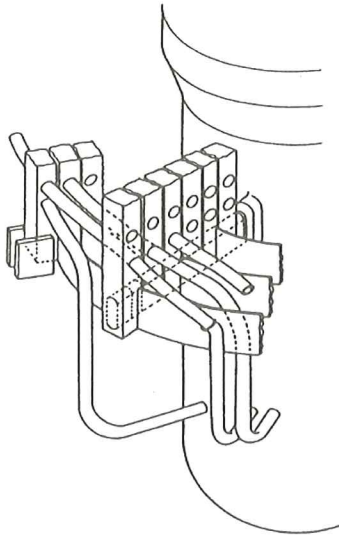


図16 伝熱管下端部(フレキシブル部)構造

[出典] Akira Shimizu, Noboru Matsumura, etc: "Recent research and development of intermediate heat exchanger for VHTR plant", IAEA, Specialists' meeting on heat exchanging components of gas-cooled reactors Duesseldorf 16-19, Apr. 1984, IWGGCR-9

には③の方式が採用されている。

図15は内筒(Center pipe)と伝熱管支持金物との軸方向の熱伸び差の低減方法につき説明したものである。内筒も伝熱管支持金物も固定点は容器の上方の支持梁の部分であり、吊り下げ構造で下方に自由に熱伸びさせる。しかし、伝熱管支持金物とともに熱伸びする伝熱管は内筒最下部の高温マニホールド(Hot header)部分で内筒に接続されているので、熱応力を低減するためには、できるだけ両者の熱伸び量が同じであることが望ましい。高温の2次ヘリウムガスが流れる内筒は内側に断熱材を貼ることによって、伝熱管支持金物とメタル温度を近づけることとした。伝熱管支持金物は1次ヘリウムガスが満たされた空間中に吊り下げられているため、メタル温度はほぼ1次ヘリウムガスの温度と等しくなる。内筒の下部にはレデューサが設けられている。レデューサより下部は内筒の外面に断熱材を貼ることにより内筒の温度が2次ヘリウムガス温度より高くなるのを防止する。上述のように、レデューサより上のレベルでは内筒と伝熱管支持金物の下向きの熱伸び量は

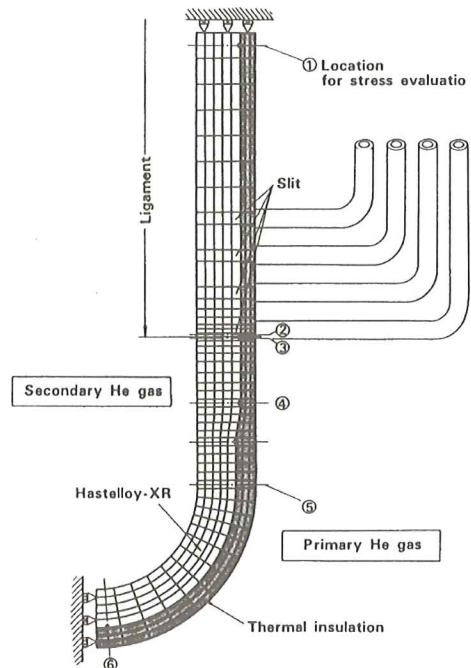


図17 高温マニホールド部の解析モデル図

[出典] 図16と同じ

ほぼ等しくなる。それより下方の部分については伝熱管支持金物は1次ヘリウムガス温度(950℃)、伝熱管支持金物下端とマニホールドの間の伝熱管はそれより約55℃低い伝熱管温度(895℃)、外面に断熱材を貼った内筒部分は2次ヘリウム出口温度(860℃)になって部材間に温度差が発生するが、伝熱管の引き回しによりフレキシビリティを与えて応力の軽減を図っている。図16に伝熱管下端のフレキシブル部の構造を示す。

4.3.4 応力の低減

(1) 高温マニホールド

IHXの内筒先端の高温マニホールド(Hot header)は1次ヘリウムガス入口温度と、2次ヘリウムガス出口温度の中間に位置して非常に高温になる。図15に高温マニホールド部分の断熱材設置状況を示す。マニホールド先端の半球部分は流入直後の高温の1次ヘリウムガスにさらされるので外面に断熱材を貼り付けた。その結果、マニホールドの板圧方向の温度差は小さくなり定格運

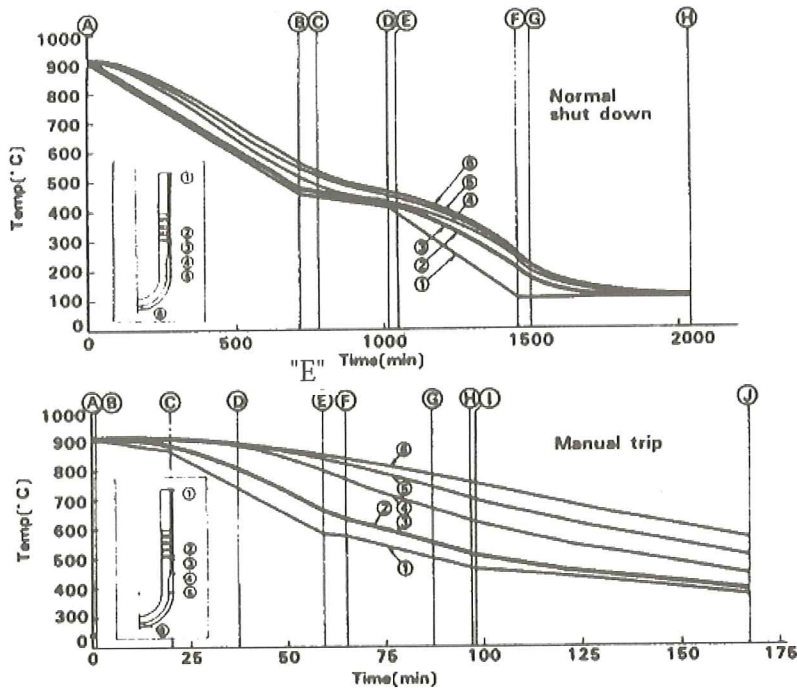


図18 IHX 停止時の各部の温度変化

[出典] 図16と同じ

転時の熱応力は小さく抑えられることになった。その反面、マニホールド先端部は外面を断熱され、内面は2次ヘリウムガスが滞留していることから、内外面ともヘリウムガスの温度変化に対する温度追従性が悪くなるので、過渡変化時の熱応力の評価が必要となる。マニホールドは軸対称であるため、円周方向の温度分布は均一と考えられるので、鉛直方向の断面のうち、軸対称部分の片方だけをとり出して図17のようにモデル化する。マニホールド外面には断熱材が貼り付けられる。また、穴が開いた高温管板部分をリガメント(Ligament)部と呼ぶがその部分は内部を2次ヘリウムガスが高速で通過するためヘリウムガス温度変化に対し温度追従性が非常に良くなる。

以下は構造検討の初期段階での検討結果で、最終的な形状と過渡応答曲線を使った強度評価ではないが、評価の一例として説明する。図18の上段に通常停止の場合のマニホールド各部の温度変化を示し、同じく下段に手動トリップの際の温度変

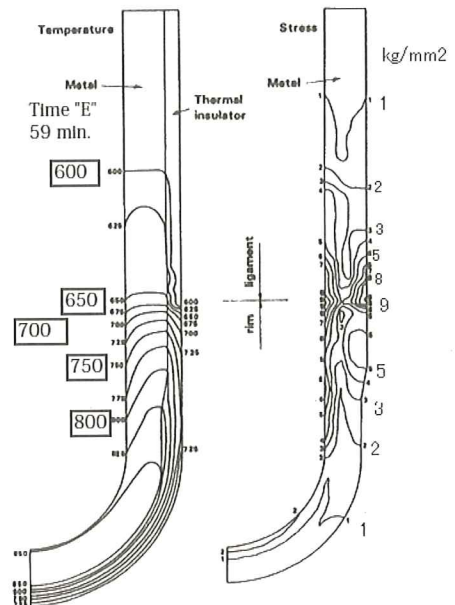


図19 手動トリップ時の高温マニホールド部の温度・応力分布

[出典] 図16と同じ

化を示す。当然ながら手動トリップの方が、温度変化が急激である¹¹⁾。場所ごとの温度変化を比べると②で示すリガメント部は、2次ヘリウム温度変化に遅れなく追従するが、④で示す穴のない部分は温度追従から取り残される。図19に手動トリップ開始から、59分後の、温度分布と応力分布を示す。②と③の境界部すなわちリガメント部と円筒の境界付近に最大応力が発生する¹¹⁾。

試設計の結果、この熱応力を減らすためには、リガメント部より下部の円筒および半球部分ではできるだけ体積(すなわち熱容量)を小さくして追従遅れを少なくすることが重要であることがわかった。このように強度評価に関しては、機器の寿命中に運転スケジュールを仮定して、熱応力の値と発生回数を出し、クリープ疲労による累計損傷度が1を超えないことを検証する。

(2) 伝熱管の差圧設計

IHXの伝熱管は管外に1次ヘリウムガス、管内に2次ヘリウムガスが流れるが、万一伝熱管に細孔が開いたとしても放射能を含む1次ヘリウムガスが2次系に流れ出すことのないように、2次ヘリウムガス側の圧力を約4.2MPaとして、1次ヘリウムガスの4.0MPaより、若干高目としている。伝熱管は差圧設計を採用し、運転差圧に余裕を持たせた0.3MPaを設計圧としている。ただし、2次系の配管破断事故時には、2次系の圧力がなくなるので伝熱管に1次系圧力が全圧として作用するため、短期間の全圧設計を採用している。

(3) 内胴の差圧設計

先に述べたとおり、IHXは2重胴構造とし、外胴冷却用のヘリウムガスは、1次ヘリウムガス循環機(PHGC)で昇圧した後のものを使用する。そのため内胴は1次ヘリウムガス循環機昇圧分の圧力をういた差圧設計をしている。

4.4 伝熱性能試験結果

日本原子力研究開発機構では、設計時に想定した伝熱性能と実測より得られた伝熱性能の比較を行った結果を報告している⁹⁾。HTTRの主冷却システムの運転条件には、原子炉出力30MWで原子炉

表4 IHX 高温試験における計画値と実績値の比較

項目	単位	計画値	実績評価値 (PT-5P, 2004.6.24)
熱交換量	kW	9,942	9,672
1次冷却材 温度	入口	℃	950
	出口	℃	389
1次冷却材流量	t/h	12.2	12.44
2次冷却材 温度	入口	℃	237
	出口	℃	869
2次冷却材流量	t/h	10.82	10.81
UA(熱貫流率×伝熱面積)	kW/K	88.14	84.99
比較	%	基準	-3.6

[出典] 梶尾大輔, 中川繁昭「HTTRの中間熱交換器の伝熱性能に関する評価」, JAERI-Tech2005-040, (2005-7)

出口冷却材温度が850℃となる定格運転モードと、原子炉出口冷却材温度が950℃となる高温試験運転モードとがある¹⁰⁾。表4にIHX入口1次ヘリウムガス温度950℃の高温試験運転に対する計画値と実績値の比較を示す。

実績値は、高温試験運転では-3.6%程度設計性能より低くなっている。設計時に想定された出力30MWにおけるIHXの伝熱性能の許容範囲は+8%~-10%であり、実測値から算出された伝熱性能は設計時の範囲内にあることを確認した。

5. 水蒸気改質器の研究開発

5.1 水蒸気改質器の役割

水蒸気改質器はヘリウムガスを880℃の高温で受け入れ、メタンガス主体の天然ガスと水蒸気を混合したプロセスガスを加熱し、水蒸気改質反応により、水素、二酸化炭素、一酸化炭素等を製造する機器である。

5.2 実規模単一反応管試験装置

日本原子力研究開発機構では、HTTRと水蒸気改質システムを接続する準備作業として、2001年度に水蒸気改質器を中心に周辺設備を含めた1/30スケールモデル(水蒸気改質器の交換熱量の比で表記)である実規模単一反応管試験装置を建設

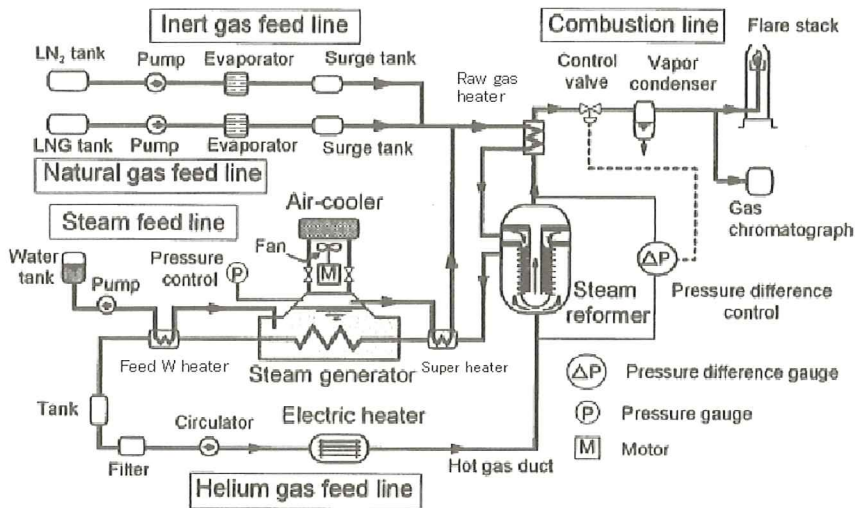


図20 実規模単一反応管試験装置系統図

〔出典〕大橋弘史，稲垣嘉之「水蒸気改質反応用触媒の反応特性(受託研究)」，JAERI-Tech 2003-046，(2003-2)

した。これは、機器の安全性および制御性の実証、水素製造性能の確認等を目的とするものである。実規模単一反応管試験装置はIHXから下流の主要機器を模擬したもので、IHXの代わりに黒鉛製の電気ヒータを使用してヘリウムガスを加熱する。このヘリウムガスを使用して110Nm³/hの水素を製造する。この装置の系統図を図20に示す¹²⁾。この実規模単一反応管試験装置は以下の機器・系統から構成される^{13), 14), 15)}。

(1) 水蒸気改質器(Steam reformer)

水蒸気改質器は装置の中心となる機器で、内部の反応管でメタンと水蒸気の混合ガスから水素を製造する。水蒸気改質反応管を圧力容器内に組み込んだ構造で、水素製造システムでは37本並列に配置される反応管を本装置では1本のみ設置する。そのため、半径方向への放熱の割合が大きくなることが懸念されるので、反応管を取り囲む形で補償ヒータブロックを設置し、補償ヒータブロックの温度をガイド管の温度に等しくなるようにヒータの入力を制御することによりヘリウムガス側の放熱を防ぐようにした。反応管の材料、寸法は、原則として水素製造システム用実機的设计条件と同一とする。

(2) ヘリウムガス供給系(Helium gas feed line)

ヘリウムガス供給系は水蒸気改質器へ定格で880℃のヘリウムガスを供給して、水蒸気とメタンの改質反応を進行させた後、給水を加熱して原料となる水蒸気を製造するために設置する。図20左下の混合タンク(Tank)のヘリウムガスはフィルター(Filter)経由でヘリウムガス循環機(Circulator)に入り、昇圧されて系統に送り出される。ヘリウムガスは流量調整弁(図20では省略)で水蒸気改質器(Steam reformer)を通過する流量を制御された後、ヘリウムガス加熱器(Electric heater)内の黒鉛製電気ヒータで900℃以上に加熱され、水蒸気改質器に所定の温度(定格880℃)で供給される。水蒸気改質器では、ヘリウムガスは原料ガス(メタンガスと水蒸気の混合ガス)から水素を製造するための加熱源として使用される。水蒸気改質器を出た約600℃のヘリウムガスは、さらに蒸気過熱器(Super heater)、蒸気発生器(Steam generator)、水予熱器(Feed water heater)の加熱源として使用される。

(3) 水蒸気供給系(Steam feed line)

水蒸気供給系は、①水蒸気改質器に原料水蒸気を安定に供給すること、②プロセス側トリップ

(機器トリップ、電源喪失)時にヘリウムガスの循環を停止することなく、ヘリウムガスを除熱することを主目的としている。

(4) 原料ガス供給系(Natural gas feed line)

原料ガス供給系は、LNG タンク内の液化天然ガス(メタンガス)を LNG 蒸発器(Evaporator)で気化した後、過熱水蒸気と混合し、原料ガス加熱器(Raw gas heater)等で加熱して水蒸気改質器に原料ガスとして供給する。この原料ガスは改質反応により、水素と二酸化炭素を多量に含む製品ガスになる。実規模単一反応管試験装置の場合は、製品ガスの総量を計量し、成分分析した後は燃焼系(Combustion line)のフレアスタック(Flare stack)で燃焼させる。

(5) 不活性ガス供給系(Inert gas feed line)

不活性ガス(窒素ガス)供給系は、試験装置の起動時に、原料ガス(メタンガスと水蒸気)が供給されるまでの間、原料ガス供給設備と燃焼系の圧力を維持し、水蒸気改質器内でヘリウムガスの持つ熱を除熱するのに使用される。水蒸気改質器内の温度が充分に上昇したのち、原料ガスの供給開始と同時に、不活性ガスの供給量を次第に減少させて約30分で供給停止する。水素製造試験終了後の原料ガス停止時には、起動時と反対に、原料ガスの減少に合わせて不活性ガスの供給量を増加させ、原料ガス供給系内の、メタンガス、水素ガスなど可燃性のガスを完全に掃気した後、不活性ガスの供給を停止する。

5.3 機器の概要

水蒸気改質器の伝熱方式は直交フィン型二重管式であり、図21に示すように外側のガイド管とフィン付反応管に挟まれたアニユラー部分に高温のヘリウムガスを流し、反応管と内管(戻り管)に挟まれた触媒充填層内を流れるプロセスガスを加熱する。反応後のプロセスガスは反応管の先端部で反転し(バイオネット型)、生成ガスとして内管の内側を上昇しながら内管を通してプロセスガスを加熱する。これによって排熱回収を行っている。

水蒸気改質器の機器仕様を表5に、概略構造を

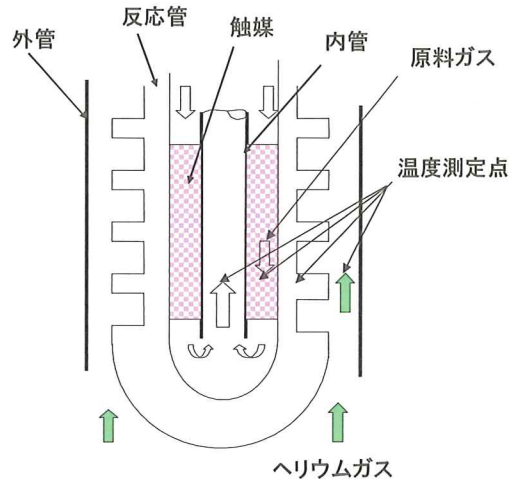


図21 水蒸気改質器の単一反応管構造

図22に示す³⁾。反応管(Reaction tube)の本数は37本である。実規模単一反応管試験装置は反応管1本を抜き出したものであり、構造図を図23に示す¹³⁾。

水蒸気改質器にはIHXと同じハステロイXRを使うので、材料特性に関してはすでに実施した研究開発成果を共通して使用できる。触媒は化学平衡に達する時間を短くするために使用するもので、水蒸気改質用には、アルミナを担体とし、担持金属としてニッケルを含浸させたものを使う。触媒の形状は円柱状、球状、リング状など様々である。起動・停止時にペレット状の触媒と外側の反応管あるいは内側の戻り管との摺動によって触媒が破損する可能性がある。このため、実規模単一反応管試験装置の触媒は、できるだけ破砕強度の大きい円柱状および球状の触媒から選定した¹⁶⁾。

5.4 設計上の工夫

5.4.1 実規模単一反応管試験装置の設計方針

実規模単一反応管試験装置の水蒸気改質器の設計に当たっては、あくまでも試験装置であることを考慮し、実機の模擬、伝熱性能の把握、小流量でも放熱量は実機並みに抑制すること、を考慮し、以下の基本方針を定めた¹⁷⁾。

(1) 反応管は、水素製造システム向けの実機と同じくバイオネット型とする。また、伝熱促進手

表5 HTTR に接続した場合の水蒸気改質器仕様

区 分	項 目	単 位	仕 様	
全 般	設備名称	—	HTTR 水素製造システム	
	機器名称	—	水蒸気改質器	
	型 式	—	直交フィン付き二重管 バイオネット式	
	基 数	基	1	
	設計交換熱量	kW	3,318	
	必要伝熱面積	m ²	290	
使用条件	場 所	—	胴 側	管 側
	流 体	—	ヘリウム ガス	メタン/ 水蒸気
	流 量	g/s	2,519.4	389/1,559
	圧 力	MPa	4.07	4.33
	入口温度(入口ノズル)	℃	880	450
	出口温度(出口ノズル)	℃	585	580
	反応管先端温度	℃	—	800
	対数平均温度差	℃	105.1	
主要寸法	胴	内 径	mm	1,950
		板 厚	mm	45
		全 長	mm	12,500
	伝熱管	外径(根元)	mm	153.8
		内 径	mm	127.8
		板 厚	mm	13
		本 数	本	37
		必要長	mm	7,506
		決定長	mm	7,900
	フィン	フィン外径	mm	157.8
		フィン高さ	mm	2
		フィンピッチ	mm	3
		フィン厚さ	mm	1
	伝熱管配置	管ピッチ	mm	192.5
		配 列	—	格子配列
	外管(ガイド管)内径		mm	167.8
材 料	胴		—	SCMV4-2
	伝熱管		—	ハステロイ XR
	管 板		—	ハステロイ XR
	断熱材		—	カオウール

〔出典〕西原哲夫, 清水 明他「HTTR に接続する水素製造システムの
系統及び機器設計(受託研究)」, JAERI-Tech 2002-101, (2003- 1)

法を積極的に採用して、局所的に低温部分が発生しないようにする。組立と触媒の充填/取出しが容易な構造にする。

(2) 温度, 圧力, 差圧, ガスサンプリング等の計測位置を検討し, これらの引出しノズルを圧力容器に設ける。

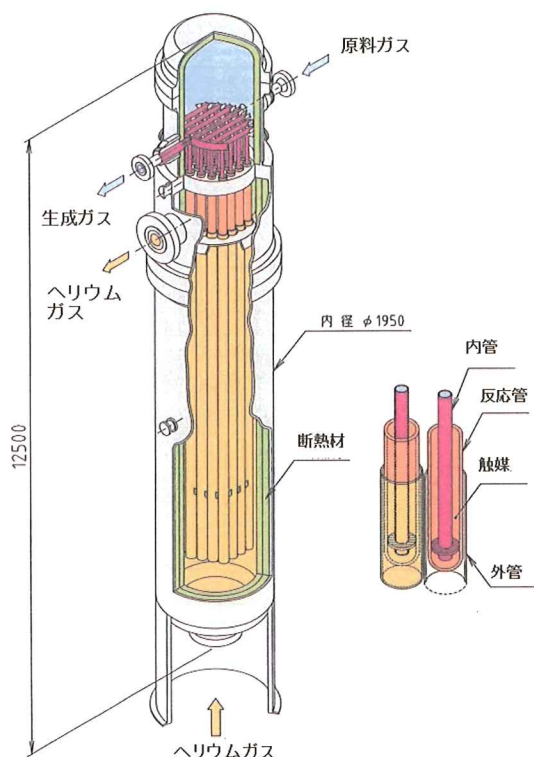


図22 HTTR 水素製造システム水蒸気改質器構造図

[出典] 西原哲夫, 清水 明他「HTTR 水素製造システムの系統構成および制御性」, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 2, No. 4, (2003-1)他より改訂

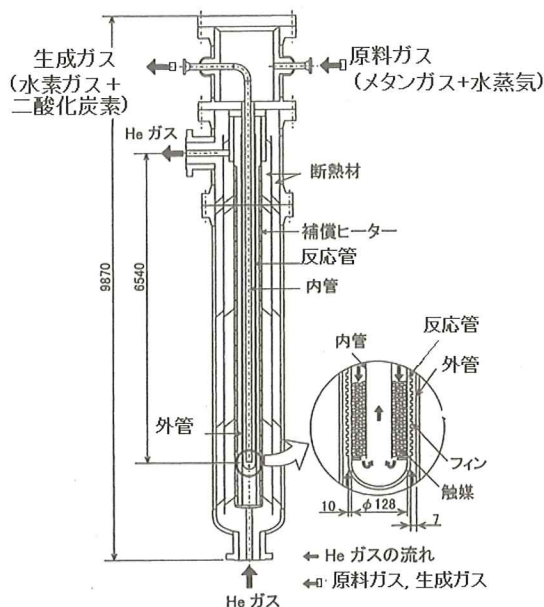
- (3) ヘリウムガス側の放熱防止のために、反応管の周囲に補償ヒータブロックを設置する。ヒータブロックは個々に温度制御(差温制御)が可能となるようにする。

5.4.2 反応管外側の伝熱促進策

ヘリウムガスから反応管への熱伝達を促進し、水蒸気改質反応のメタン転換率の向上を図るために、反応管外側の伝熱促進策が必要である。流路形状の効果につき日本原子力研究所が比較検討した結果を以下に紹介する。

図24に示す6方式について検討を行った¹⁷⁾。

- (a) 二重管
- (b) バッフル付き二重管
- (c) 螺旋板付き二重管
- (d) 溶接直交フィン付き二重管(フィンが母管に溶接で取付け)



水蒸気改質器の構造.

図23 実規模単一反応管試験装置構造図

[出典] 清水 明, 大橋弘史他「HTTR 水素製造システム実規模単一反応管試験装置の熱交換器の伝熱性能評価結果(受託研究)」, JAERI-Tech 2005-031, (2005-1)

- (e) オリフィスバッフル板付き二重管
- (f) 削り出し直交フィン付き二重管(矩形突起は機械加工により削り出し)

各伝熱促進手段とも二重管の隙間を狭くするにつれて熱伝達率は向上する。一方、圧力損失も上昇するため、機器またはシステムの許容圧力損失から、熱伝達率の限界が決定される。反応管部での許容圧力損失は、0.02MPaと想定して評価した。伝熱促進効果、隙間管理の容易さ、製作性を考えて伝熱促進手段の評価をした結果を表6に示す¹⁷⁾。

伝熱性能を重視して、(d)の溶接直交フィン付き二重管と(f)の削り出し直交フィン付き二重管を候補として選定し、最終的には伝熱性能は(d)の溶接直交フィン付きに比べて劣るが製作性の良い(f)の削り出し直交フィン付き二重管を採用することとした。製作コストをできるだけ低減するため、フィン高さは1mmとした。

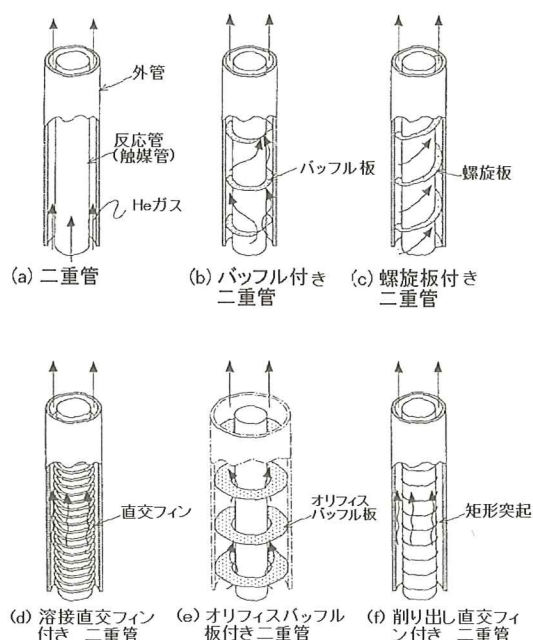


図24 水蒸気改質器伝熱促進策形状比較

[出典] 羽賀勝洋, 日野竜太郎他「HTTR 熱利用系炉外技術開発試験用水蒸気改質器の基本設計の検討(受託研究)」, JAERI-Tech 96-053, (1996-11)

5.4.3 温度の低減

水蒸気改質器は内部断熱の単胴の構造としている。これは、内部流体が2次ヘリウムガスと原料ガスであり、原子炉を循環している1次ヘリウムガスでないため、万一外胴が損傷して2次ヘリウムガスが流出しても、その中に含まれる放射能は少なく、公衆に及ぼす被害が小さいことによる。胴側流体である高温ヘリウムガスは、880℃で流入し、585℃で流出するが、外胴の内側に断熱材を貼ることにより、外胴の温度を低温に保ち許容応力が大きくとれるよう配慮した。

高温の2次ヘリウムガスをIHxから水蒸気改質器まで、輸送する配管については、外管の強度確保を目的として、二重管構造を採用した。

5.4.4 温度差の低減

水蒸気改質器の内部構造物は熱伸びの起点を低温となる上部とし、鉛直方向下向きの熱伸びは最下部の高温伝熱管端部を固定せず自由に熱伸びできるようにして吸収する。また、触媒を挟んで近

接する外側の反応管と内側の内管は、温度解析により軸方向にはほぼ等しい温度分布をとる(同一高さの軸方向位置では反応管と内管の温度がほぼ等しい)ことが予想された。実規模単一反応管試験装置を使用した試験では、図25に示すように水蒸気改質器の触媒の外側に位置する反応管と内側に位置する内管の温度を、内部に設置した熱電対の測定データから算出した¹³⁾。算出結果では、反応管の温度が内管の温度より約30℃高くなるが、管全長6300mmと線膨張係数をかけて、下部先端での熱伸び差を計算したところ3mm以下であり、触媒ペレットの摺動で充分吸収できる範囲にあることがわかった。

5.4.5 応力の低減

前述のとおり、高温機器の設計で重要な点は、構造体の自重を支える箇所と、熱伸びの吸収部分をどこにするかである。水蒸気改質器では、上述のように、伝熱管の自重を支える部分を原料ガス入口の管板とし、そこを熱伸びの起点として鉛直方向下向きの熱伸びは最下部の高温伝熱管端部を固定せず自由に熱伸びできるようにする。伝熱管はバイオネット式としており、反応後のプロセスガスは反応管の先端部で反転し、生成ガスとして内管の内側を上昇する。触媒管と内管は長手方向には拘束していないので、若干の温度差による熱伸び量の差は両者がスライドすることで解消できる。

5.5 水素製造試験結果

本試験装置はHTTRへの接続が予定されている水蒸気改質法による水素製造システムのモックアップモデルとして、2001年度に総合機能試験を実施した後、2002年3月から水素製造試験等の種々の試験を実施し、2004年12月までに各種の熱交換器に関する運転データを取得して試験を終了した。

実規模単一反応管試験装置の定格条件時における水素製造量は、水素製造システム実機(4200N m^3/h)の約1/38で、110N m^3/h である。本試験装置がこの設計値を満足する水素製造性能を有して

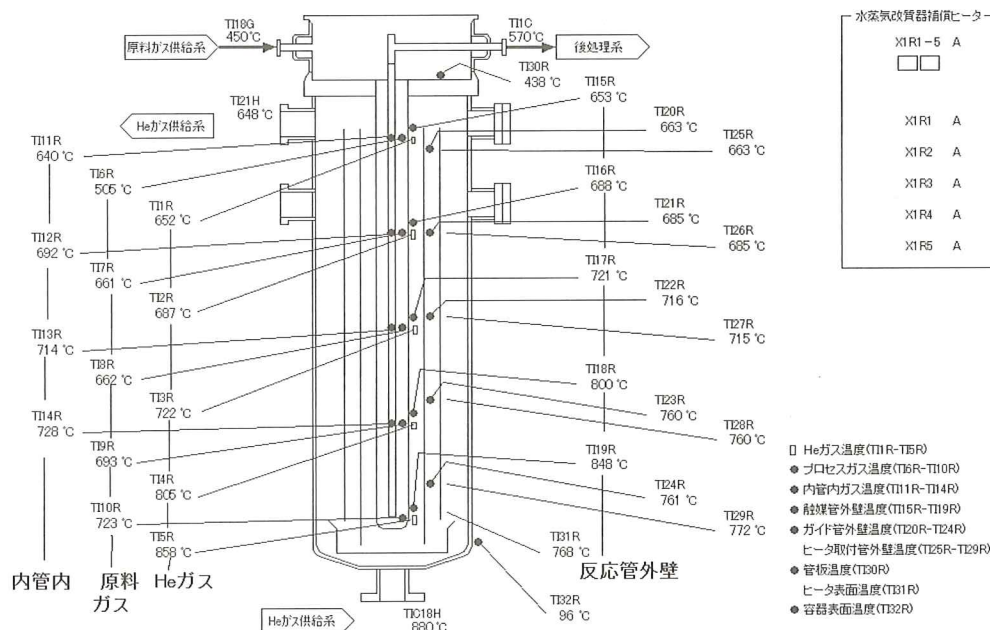
表6 伝熱促進手段の評価

項 目	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
伝熱促進手段	二重管	バッフル付き 二重管	螺旋板付き 二重管	溶接直交フィン 付き二重管	オリフィス バッフル板付き 二重管	削り出し 直交フィン付き 二重管
熱伝達率 $W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$ ($kcal/m^2h\text{ }^\circ\text{C}$)	1,070 (920)	116~428 (100~400)	1,023~1,346 (880~1,160)	1,489~2,186 (1,280~ 1,880)	744~1,047 (640~900)	1,279~1,442 (1,100~ 1,240)
伝熱促進効果	基準 (○)	×	○	◎	△	◎
ヘリウム通路 の隙間管理性	○	◎	○	○	◎	○
製作性	○	△	△	×	△	○
特記事項	隙間精度管理が 困難	伝熱促進効果低 い	螺旋板と流路管 との隙間のバイ パス流	伝熱促進効果良 製作コスト高	必要バッフル板 数が多い	伝熱促進効果良 溶接直交フィン に比べ製作性良
総合評価	○	△	○	○	○	◎

〔出典〕 羽賀勝洋, 日野竜太郎, 羽田一彦他「HTTR 熱利用系炉外技術開発試験用
水蒸気改質器の基本設計の検討(受託研究)」, JAERI-Tech 96-053, (1996-11)

水蒸気改質器

03/06/01 16:16:43



	プロセスガス	ヘリウムガス
水蒸気改質器入口温度 [°C]	465.2	870.4
水蒸気改質器入口圧力 [MPa]	4.26	4.14
ガス流量 [g/s]	CH ₄ 12.0 H ₂ O 46.6	91.0
S/C	3.45	—

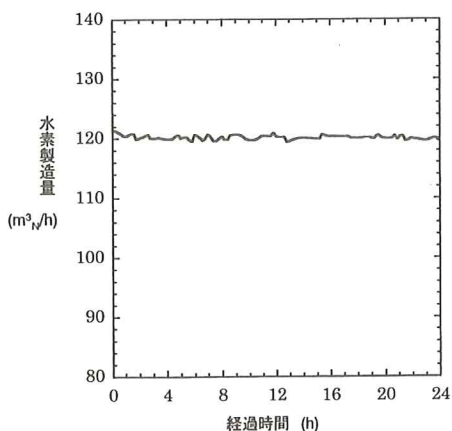


図26 実規模開発試験装置での水素製造試験結果

[出典] 稲垣嘉之, 林 光二, 大橋弘史, 清水 明他「HTTR 水素製造システム実規模単一反応管試験装置の機能試験結果報告(受託研究)」, JAERI-Tech 2003-034, (2003-5)

いることを確認した。定格条件到達後のシステムが安定した状態における24時間の水素製造量の変化を図26に示す¹⁴⁾。

この時の水蒸気改質器入口におけるプロセスガス, ヘリウムガスの温度, 圧力はほぼ安定していた。

一方, 流量の平均値は原料ガス流量12.0 g/s, 水蒸気流量は46.6 g/s, ヘリウムガス流量は91.0 g/sであった。水素製造量の平均値は120.2 Nm³/hで, 常に安定した値を示した。また, 生成ガス冷却器出口で未反応の水蒸気を除去した生成ガスのガスクロマトグラフ分析結果の平均値は, 表7に示すとおり, 水素(H₂)が66.3%, 一酸化炭素(CO)が6.9%, 二酸化炭素(CO₂)が11.5%およびメタン(CH₄)が15.2%であった。この数値から算出した水蒸気改質反応における元のメタンのうち化学変化して水素と一酸化炭素になった割合を示すメタン転化率は0.548, シフト反応における一

表7 水素製造試験結果

項 目	単位	結果
定格水素製造量	Nm³/h	110
入口流量	原料ガス流量	g /s
	水蒸気流量	g /s
	ヘリウムガス流量	g /s
水素製造量	Nm³/h	120.2
生成ガス成分 (dry base)	水素 (H ₂)	%
	一酸化炭素 (CO)	%
	二酸化炭素 (CO ₂)	%
	メタン (CH ₄)	%

[出典] 稲垣嘉之, 林 光二, 大橋弘史, 清水 明他「HTTR 水素製造システム実規模単一反応管試験装置の機能試験結果報告(受託研究)」, JAERI-Tech 2003-034, (2003-5)

酸化炭素の反応効率である CO 転化率(CO→CO₂)は0.625であり, 水素製造量はほぼ予想された値を確保することができた。

6. 結 論

本稿では, 水蒸気改質法による水素製造システムと, その1/30スケールモデルである実規模単一反応管試験装置の系統の設計と試験結果を説明した。

水素製造システムで使用される高温の熱交換器伝熱管のメタル温度は, 外側と内側の流体温度の中間温度になり, 必ず2次側流体の最高温度以上となり, ボイラ, タービンに比べ非常に高温になることから, 高温に対応した設計が必要となることを述べた。HTTR の IHX に対しては高温強度に優れた材料ハステロイ XR を開発し, 建設に先立ってクリープ疲労解析などを実施した。また, 熱応力を低減するための構造上の工夫をした。

試験の結果は, HTTR の IHX では, ほぼ事前に予測した範囲の伝熱性能を確保できていることと, 実規模単一反応管試験装置の水蒸気改質器では, 水素製造量が事前の計画値を確保できたことが確認できた。

謝 辞

高温のガスを取り扱う機器の例として、三菱重工技報からはガスタービンの設計法を参考にさせていただきました。また、水蒸気改質器に関しては、原子力研究所で開発研究の指導をいただいた稲垣嘉之氏、西原哲夫氏、大橋弘史氏をはじめとする高温機器開発試験室メンバーに感謝いたします。共同でまとめた HTTR 水素製造システムのモックアッププラントである「実規模単一反応管試験装置」の技術報告書の一部を本稿に引用させていただきました。また、IHX の伝熱計算式、性能試験結果に関しては、栃尾大輔氏の技術報告を引用させていただきました。ここに記して深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 清水 明, 藤川卓爾: 水素エネルギー社会に向けて, 長崎総合科学大学紀要, Vol.47, No. 1, (2006-9), pp.1-16.
- 2) 栃尾大輔, 中川繁昭, 古澤孝之: 高温ガス炉 HTTR の高温試験運転における主冷却系熱交換器の性能評価, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 4, No. 2, (2005), pp. 55-63.
- 3) 西原哲夫, 清水 明, 谷平正典, 内田正治: HTTR に接続する水素製造システムの系統及び機器設計(受託研究), JAERI-Tech2002-101, (2003-1), p46.
- 4) 西原哲夫, 清水 明, 稲垣嘉之, 谷平正典: HTTR 水素製造システムの系統構成および制御性, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 2, No. 4, (2003), pp. 139-146.
- 5) 阿部 豊: 対流伝熱と各種伝熱面, 筑波大学大学院構造エネルギー工学講義資料
- 6) 福泉靖史, 潮 成弘, 有村久登: 大容量ガスタービンの最新技術動向, 三菱重工技報, Vol.40, No. 4, (2003-7), pp.194-199.
- 7) 塚越敬三他: 大型発電用ガスタービンの最新技術動向, 三菱重工技報, Vol.42, No. 3, (2005-10), pp.98-103.
- 8) 日本原子力研究所: たゆまざる探求の軌跡—

1996

- 9) 栃尾大輔, 中川繁昭: HTTR の中間熱交換器の伝熱性能に関する評価, JAERI-Tech2005-040, (2005-7), pp. 1-39.
- 10) 清水 明, 藤川卓爾, 川添 強: 高温ガス炉 (HTGR) の実用化を目指して, 長崎総合科学大学紀要, Vol. 48, No. 1, (2007-3), pp. 93-109.
- 11) Akira Shimizu, Noboru Matsumura, etc: "Recent research and development of intermediate heat exchanger for VHTR plant", IAEA, Specialists' meeting on heat exchanging components of gas-cooled reactors Duesseldorf(Germany)16-19, Apr.1984, IWGGCR-9,(1984-4), pp.82-93.
- 12) 大橋弘史, 稲垣嘉之: 水蒸気改質反応用触媒の反応特性(受託研究), JAERI-Tech2003-046, (2003-2), p47.
- 13) 清水 明, 大橋弘史, 稲垣嘉之他: HTTR 水素製造システム実規模単一反応管試験装置の熱交換器の伝熱性能評価結果(受託研究), JAERI-Tech2005-031, (2005-6), p174.
- 14) 稲垣嘉之, 林 光二, 大橋弘史, 清水 明他: HTTR 水素製造システム実規模単一反応管試験装置の機能試験結果報告(受託研究), JAERI-Tech2003-034, (2003-5), p129.
- 15) 林 光二, 稲垣嘉之, 大橋弘史, 清水 明他: HTTR 水素製造システム実規模単一反応管試験装置, 平成13年度試験運転報告(受託研究), JAERI-Tech2005-032, (2005-6), p46.
- 16) 稲垣嘉之, 大内義弘, 藤崎勝夫他: HTTR 水素製造システムの炉外開発, 水蒸気改質器の構造と製作上の技術課題(受託研究), JAERI-Tech 99-074, (1999-10), p63.
- 17) 羽賀勝洋, 日野竜太郎, 稲垣嘉之, 羽田一彦他: HTTR 熱利用系炉外技術開発試験用水蒸気改質器の基本設計の検討(受託研究), JAERI-Tech 96-053, (1996-11), p71.